

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 16 日現在

機関番号：82707

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24656316

研究課題名(和文)CO<sub>2</sub>とO<sub>2</sub>フラックスの長期広範囲連続計測法開発によるブルーカーボン研究基盤創出研究課題名(英文)Creating the foundation of blue carbon studies by developing the methodology for long-term, wide-range, and continuous measurement of CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> fluxes

研究代表者

桑江 朝比呂 (Kuwae, Tomohiro)

独立行政法人港湾空港技術研究所・沿岸環境研究チーム・チームリーダー

研究者番号：40359229

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：沿岸域はCO<sub>2</sub>の放出源であると従来考えられてきたものの、海洋植物が豊富な浅海域では、吸収源となっている事例も散見されている。しかしながら、陸・河川・外洋の影響を受け、流動や物質生成・消費の時空間的变化が激しい浅海域では、吸収源となり得る条件の解明に不可欠な、高精度で時空間的に濃密な計測の見通しがまったく立っていなかった。

本研究では、浅海域において大気-海水間CO<sub>2</sub>フラックスを長期間広範囲連続で計測できるシステムを新たに開発し、高精度で時空間的に濃密で信頼性の高いデータを、開発したシステムを用いて取得可能であることを示し、「ブルーカーボン研究」という新学術分野の基盤技術を創出した。

研究成果の概要(英文)：“Blue Carbon”, which is carbon captured by marine living organisms, has recently been highlighted as significant carbon stocks due to the high burial rates and long term sequestration. However, the direct contribution of Blue Carbon to the uptake of atmospheric CO<sub>2</sub> through air-sea gas exchange is unclear. We performed in situ measurements of carbon flows. In particular, the air-sea CO<sub>2</sub> flux was measured using three methods: the bulk formula method, the floating chamber method, and the eddy covariance method.

Our empirical results show that submerged autotrophic vegetation in shallow coastal waters can be functionally a sink for atmospheric CO<sub>2</sub>. The key factor determining whether or not coastal ecosystems directly decrease the concentration of atmospheric CO<sub>2</sub> may be net ecosystem production. This study thus identifies a new ecosystem function of coastal vegetated systems; they are direct sinks of atmospheric CO<sub>2</sub>.

研究分野：沿岸生元素循環, 沿岸生態学, 沿岸環境工学

キーワード：気候変動 二酸化炭素吸収 生態系サービス 環境計測 渦相関法

### 1. 研究開始当初の背景

海洋による CO<sub>2</sub> 吸収は外洋で発揮されていて、陸域からの負荷を受ける沿岸域では有機物が分解する場、すなわち CO<sub>2</sub> の放出源と考えられている (たとえば Regnier et al., 2013). ところが近年、いくつかの既往研究においては、吸収源となっている事例も示されるようになってきた (たとえば, Gazeau et al., 2005; Kone et al., 2009).

国連環境計画 (UNEP) は、生物によって吸収・固定される炭素 (グリーンカーボン) のうち、海洋とりわけ浅海域で吸収・固定される炭素を「ブルーカーボン」と新たに称し、その重要性を示した (Nellemann et al., 2009). しかしながら、陸・河川・外洋の影響を受け、流動や物質生成・消費の時空間的变化が激しい複雑な場という浅海域の特性により、新たな吸収源としての認証に不可欠な高精度で時空間的に濃密なデータ計測の見通しは、まったく立っていなかった。

### 2. 研究の目的

本研究では、渦相関法のカップリングにより、沿岸浅海域において大気-海水間 CO<sub>2</sub> フラックスと海水-底生系間 O<sub>2</sub> フラックスを、長期間広範囲連続で同時に計測可能なシステムを開発する。次に、CO<sub>2</sub> 吸収源として新たに認証されるために不可欠な、高精度で時空間的に濃密で信頼性の高いデータを、開発したシステムを用いて取得可能であることを示す。そして、「ブルーカーボン研究」という新学術分野の基盤技術を創出するため、沿岸浅海域が実は CO<sub>2</sub> の吸収源であることを示す科学的根拠となるデータを提示する。

### 3. 研究の方法

沿岸海域が気候変動の緩和に寄与するのは、フロー (大気中 CO<sub>2</sub> を直接正味で吸収) もしくはストック (海域中に炭素を貯留) の2つの過程である。したがって、このフローやストックを厳密に定量し、沿岸海域による気候変動緩和機能を検証することが重要である。

陸域からの負荷を受け有機物分解する沿岸域は CO<sub>2</sub> の放出源と考えられてきたものの、沿岸植生は活発な光合成能力を示すことから (図1), 「有機物の分解に伴う CO<sub>2</sub> の発生を上回るほど植生が一次生産 (光合成) を行えば、CO<sub>2</sub> を吸収するのではないか」との仮説を立てた。

しかしながら、沿岸海域は陸・河川・外洋の影響を受ける時空間的に複雑な場であるため、炭素フローやストックの実態把握は困難を極める。そこで、最先端の現地観測技術である渦相関法をはじめとする手法 (図2) やデータ解析技術を開発して用いることにより、この未知なる炭素フローやストックの解明に挑戦した。具体的には以下のとおりである。

(1) 長期間広範囲連続自動フラックス計測法: CO<sub>2</sub> 渦相関法は超音波風速計と CO<sub>2</sub> センサーとを組み合わせる。O<sub>2</sub> 渦相関法は超音波流速計と微小酸素電極または酸素計を組み合わせる。そして、データ信頼性の担保に不可欠となる、環境特性に応じた変動成分の抽出方法を確立する。開発した手法を検証するため、従来法 (チャンバー法およびバルク法と比較する。

(2) 環境データ: 吸収された CO<sub>2</sub> が大気へ



図1 海草(アマモ)の濃密な生息(風蓮湖)



図2 大気と海水の間の CO<sub>2</sub> 吸収・放出(フラックス)を観測する装置. 上: 渦相関システム(大気中 CO<sub>2</sub> 濃度と鉛直風速の変動成分を連続観測する手法), 下: チャンバーシステム(チャンバー内に閉じ込められた大気中の CO<sub>2</sub> 濃度の経時変化を観測する手法).

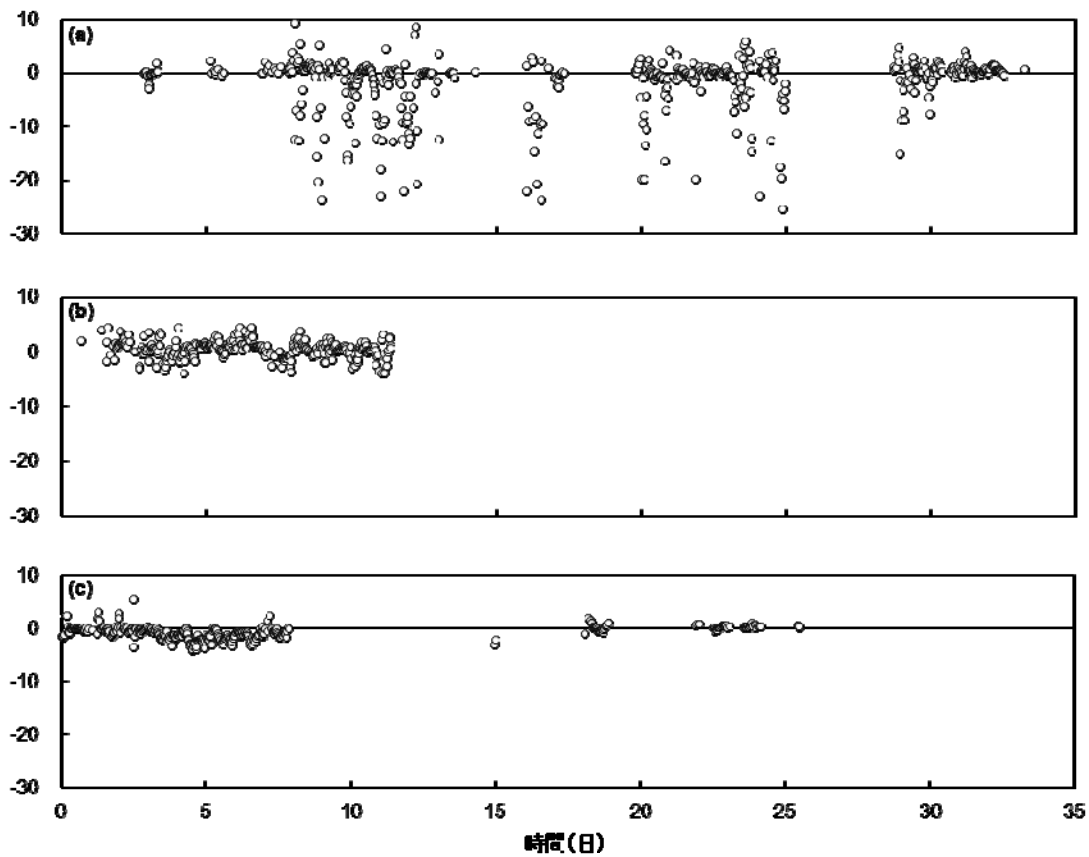


図3 渦相関法で計測された大気－海水間の  $\text{CO}_2$  フラックス ( $\mu\text{mol-C}/\text{m}^2/\text{s}$ ) (Tokoro et al. 2014). a): 風蓮湖(夏季), b): 風蓮湖(冬季), c): (沖縄県石垣市吹通川河口). 30分ごとに連続的にフラックスが計測されている. 大気－海水間の  $\text{CO}_2$  フラックス. マイナスは大気→海水の方向(大気中  $\text{CO}_2$  の吸収)を示す.

回帰されずに留まる過程と、その持続時間の解明が、 $\text{CO}_2$  吸収源として浅海域が機能する科学的根拠を与える. そこで、植物体への  $\text{CO}_2$  吸収後の環境運命、例えば、溶存無機炭素 (DIC) の収支、難分解性の有機物 (DOC) の生成、有機物 (POC) の堆積物へ埋没など、炭素フローにおいてキーとなるデータを収

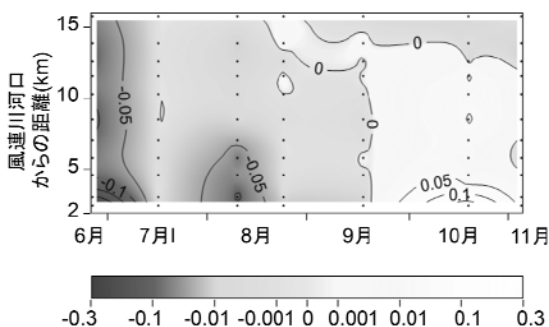


図4 バルク法(大気と海水間との間の  $\text{CO}_2$  分圧差とガス交換係数を用いる手法)で計測された風蓮湖における大気－海水間の  $\text{CO}_2$  フラックス ( $\mu\text{mol-C}/\text{m}^2/\text{s}$ ) (Tokoro et al. 2014). 年間スケールで大気中の  $\text{CO}_2$  が海域へ吸収されている(フラックスの平均値:  $-0.018 \mu\text{mol C}/\text{m}^2/\text{s} = 24 \text{ g CO}_2/\text{m}^2/\text{年}$ ). 12月～4月は結氷期.

集する.

#### 4. 研究成果

風蓮湖(北海道根室市)(図1), 久里浜海

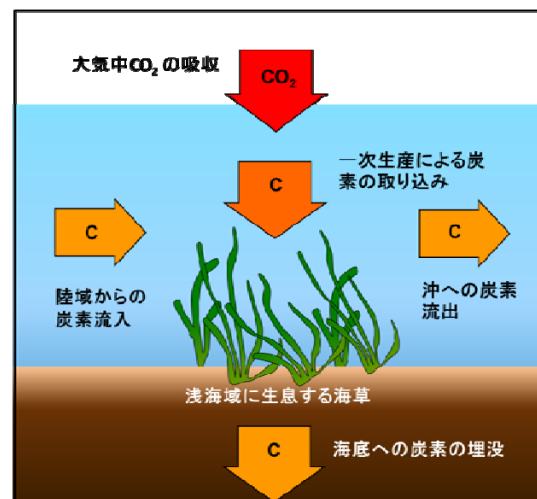


図5 海草場における一次生産(光合成)により、海草場内の炭素や陸から流入した炭素が取り込まれる. 水中の炭素減少に応じて、大気中の  $\text{CO}_2$  が海水に吸収される. 海底に埋没した炭素は、数千年スケールで隔離貯留される.

岸（神奈川県横須賀市），吹通川河口（沖縄県石垣市）の海草場において，現地観測（図2），水底質の化学分析，そしてデータの統計解析を実施した．その結果，通説とは異なり，内湾河口域の海草場が大気中のCO<sub>2</sub>を吸収できることを突き止めた（Tokoro et al. 2014, 図3, 4, 5）．特に風蓮湖では，年間平均でもCO<sub>2</sub>を大気から吸収していた．海草場の一次生産が呼吸や分解を卓越すればするほど，大気中CO<sub>2</sub>を吸収することも明らかにした．

主要な成果は上記のとおりであるが，その他の研究内容と成果の概要を下記にとりまとめた．

- (1) 白保（沖縄県石垣市）の海草場において，O<sub>2</sub>渦相関法を用いて底生系－海水間のO<sub>2</sub>渦相関フラックスを昼夜連続観測し，求められた溶存物質の交換係数を用いることにより，底生系－海水間の全アルカリ度フラックスを推定した（Yamamoto et al., 2015）．
- (2) 走水海岸（神奈川県横須賀市）の海草場において，夏季と冬季に炭酸系や栄養塩等の水質の昼夜連続測定を実施した結果，夏季と冬季ともに，大気中CO<sub>2</sub>の吸収源となっていた．統計解析の結果，CO<sub>2</sub>フラックスに与える直接的な要因として風速と水中のCO<sub>2</sub>分圧，間接的な要因として水中の一次生産速度が検出された（田多ほか，2014）．
- (3) 大気－海水間のCO<sub>2</sub>フラックスの規定要因について，統計的に解析する手法を検討した（田多ほか，2013a; 2013b）．
- (4) 本研究で開発した，大気－海水間CO<sub>2</sub>フラックスと海水－底生系間O<sub>2</sub>フラックスを，長期間広範囲連続で同時に計測可能なシステムを，海草場ならびに干潟において適用した



図6 本研究で開発した，大気－海水間CO<sub>2</sub>フラックスと海水－底生系間O<sub>2</sub>フラックスを，長期間広範囲連続で同時に計測可能なシステム（盤洲干潟）

（図6）．その結果，干潟においては，冠水時に大気－海水間のCO<sub>2</sub>フラックスと海水－底生系間のO<sub>2</sub>フラックスを同時に昼夜連続で計測することに成功した．ただし，荒天時には，設置した微小O<sub>2</sub>電極が漂流物によって破損したり，雨天時はCO<sub>2</sub>データが取得できないなど，天候によっては連続データの取得が途絶えてしまう課題が明らかとなった．また，海草場では，葉が流速計に絡んでしまうなどの要因により，高品質な流速値が得られない等の課題も明らかとなった．

- (5) 海草場において，海水中ならびに堆積物中の炭素の起源を推定する方法を検討した（渡辺・桑江 2013）．
- (6) GIS（衛星写真）を用いた画像解析と現地観測を統合することにより，海草藻場分布を推定した（京田ほか，2012；京田・桑江，2013）．
- (7) 長期広範囲連続計測の主軸である，渦相関法によって得られたデータの品質管理手法を検討した（所・桑江，印刷中）．具体的には，CO<sub>2</sub>センサーの受信信号強度および風速鉛直成分の標準偏差を用いたフィルタリングにより，降雨や濃霧時の異常値を除去する方法や，ハイパスフィルターにより，沿岸域CO<sub>2</sub>吸収量を修正する方法を検討した．

本研究成果の学術・社会へのインパクトを下記にまとめた．

- (1) 気候変動枠組み条約（UNFCCC）科学技術に関する補助会合（SBSTA）における我が国の気候変動対策への取り組みを説明する position paper において，研究成果（海草場が大気中CO<sub>2</sub>の吸収源）をインプット．
- (2) 予想されるブルーカーボン増減量の国別報告書インベントリへの算入や，IPCC 湿地ガイドライン改定の対応のため，政府検討会が発足し，我が国全体のブルーカーボン量の計測，報告，検証の方法について議論スタート．
- (3) トライアスロンの開催に伴う参加者の移動や会場運営で発生するCO<sub>2</sub>をブルーカーボンによってオフセットするという，世界初のブルーカーボンオフセットクレジットの社会実装がスタート．そのオフセット量の算出法などについて助言．
- (4) 海草場という生態系の重要性として，従来から知られていた稚仔魚の成長の場という役割に，気候変動の緩和という新たな価値を付加．海草場の保全や再生の考え方に，新たな視点を導入．

<引用文献>

- Gazeau F, Borges AV, Barrón C, et al. (2005) Net ecosystem metabolism in a micro-tidal estuary (Randers Fjord, Denmark): Evaluation of methods. *Marine Ecology Progress Series*, 301, 23–41.
- Kone YJM, Abril G, Kouadio KN, Delille B, Borges AV (2009) Seasonal variability of carbon dioxide in the rivers and lagoons of Ivory Coast (West Africa). *Estuaries and Coasts*, 32, 246–260.
- Nellemann C, Corcoran E, Duarte CM, Valdes L, DeYoung C, Fonseca L, Grimsditch G (2009) Blue Carbon. A Rapid Response Assessment. United Nations Environmental Programme, GRID-Arendal, Birkeland Trykkeri AS, Birkeland.
- Regnier PAG, Friedlingstein P, Ciais P et al. (2013) Anthropogenic perturbation of the carbon fluxes from land to ocean. *Nature Geoscience*, 6, 597–607.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 14 件)

- Yamamoto, S., H. Kayanne, T. Tokoro, T. Kuwae, and A. Watanabe (2015) Total alkalinity flux in coral reefs estimated by eddy covariance and sediment pore-water profiles, *Limnology and Oceanography*, 60, 229-241.
- Tokoro, T., S. Hosokawa, E. Miyoshi, K. Tada, K. Watanabe, S. Montani, H. Kayanne, and T. Kuwae (2014) Net uptake of atmospheric CO<sub>2</sub> by coastal submerged aquatic vegetation, *Global Change Biology*, 20: 1873-1884
- 田多一史・所立樹・渡辺謙太・茂木博匡・桑江朝比呂 (2014) アマモ場における大気-海水間 CO<sub>2</sub> フラックスの連続観測. 土木学会論文集 B2-70 (海岸工学) : I1191-I1195
- 田多一史・所立樹・渡辺謙太・茂木博匡・桑江朝比呂 (2014) 北海道コムケ湖における大気-海水間 CO<sub>2</sub> フラックスの空間分布特性と要因分析. 土木学会論文集 B3-70 (海洋開発) : I1188-I1193
- 桑江朝比呂 (2014) 海草場における CO<sub>2</sub> 吸収. *HEDORO* 120, 21-26
- 岡田知也・川上佐知・三戸勇吾・高濱繁盛・羽原浩史・鈴木高二朗・森田健二・関正彦・菅家英朗・桑江朝比呂 (2013) 海洋健全度を用いた沿岸環境の定量的評価手法の提案. 土木学会論文集 B2-69 (海岸工学) : I1241-I1245.

- 田多一史・所立樹・渡辺謙太・桑江朝比呂 (2013) 浅海域における大気-海水間 CO<sub>2</sub> フラックスの予測手法の検討. 土木学会論文集 B2-69 (海岸工学) : I1252-I1257.
- 渡辺謙太・桑江朝比呂 (2013) 浅海域における炭素隔離機能の評価へ向けた元素比・安定同位体比による有機物動態の解析. 港湾空港技術研究所報告 52(3): 3-34.
- 田多一史・所立樹・渡辺謙太・桑江朝比呂 (2013) 北海道風連湖における大気-海水間 CO<sub>2</sub> フラックスに影響を及ぼす要因, 土木学会論文集 B3-69 (海洋開発) : I1416-I1420
- 京田潤一・桑江朝比呂 (2013) 現地観測データと衛星画像の統合による海草藻場の分布域と密度の測定. 港湾空港技術研究所資料 No. 1273, pp. 1-17
- 所立樹・細川真也・三好英一・門谷茂・茅根創・桑江朝比呂 (2013) ブルーカーボンによる大気中 CO<sub>2</sub> の吸収源拡大に関する現地調査と解析. 港湾空港技術研究所報告 52(1): 3-49.
- 杉浦琴・高橋正一・三好英一・中村由行・桑江朝比呂 (2012) 貧酸素および硫化水素が干潟の生物に与える影響に関するメソコスモス実証実験. 水産工学 49: 101-111.
- 京田潤一・細川真也・渡辺健太郎・仲岡雅裕・柴沼成一郎・門谷茂・桑江朝比呂 (2012) 現地観測データと衛星画像を用いた海草藻場の分布域と被度の推定. 土木学会論文集 B2-68 (海岸工学) : I1466-I1470.
- 梅田悠輔・村上和男・篠崎知美・桑江朝比呂・中瀬浩太 (2012) 東京港野鳥公園干潟における窒素循環の脱窒・アナモックスと付着藻類の役割. 土木学会論文集 B2-68 (海岸工学) : I1081-I1085.

[学会発表] (計 15 件)

- Tokoro, T., S. Hosokawa, E. Miyoshi, K. Tada, K. Watanabe, S. Montani, H. Kayanne, and T. Kuwae (2014) Atmospheric CO<sub>2</sub> absorption by the Blue Carbon in the seagrass meadows of Japan. Proceedings of the AOGS (Asia Oceania Geosciences Society) 11th Annual Meeting
- Yamamoto, S., H. Kayanne, T. Tokoro, T. Kuwae, and A. Watanabe (2014): Total alkalinity flux in coral reefs estimated by eddy covariance and sediment pore-water profiles, The 3rd Asia-Pacific Coral Reef Symposium, Taiwan.
- 山本将史・棚谷灯子・茅根創・本郷宙軌・渡辺謙太・桑江朝比呂 (2014) サンゴ礁砂地におけるアルカリ度フラックスの評価 石垣島白保サンゴ礁海草帯におけるアルカリ度 Flux の観測. サンゴ礁学会講演要旨集
- 田多一史・所立樹・桑江朝比呂 (2014) 石垣島浅海域の大気-海水間 CO<sub>2</sub> フラックス

に関する現地調査とパス解析. 日本地球惑星科学連合 2014 年大会  
所立樹・渡辺謙太・三好英一・茂木博匡・田多一史・桑江朝比呂 (2014) 石垣島吹通川河口域における無機炭素循環. 日本地球惑星科学連合 2014 年大会  
山本将史・茅根創・所立樹・桑江朝比呂・渡邊敦 (2014) サンゴ礁砂地におけるアルカリ度フラックスの評価. 2014 年度日本海洋学会春季大会講演要旨集  
日置恭史郎・関口泰之・相馬明郎・中島典之・桑江朝比呂 (2014) 陸域からの栄養塩負荷が東京湾の炭素固定に与える影響～内湾複合生態系モデルを用いた解析～. 水環境学会第 48 回日本水環境学会年会  
渡辺謙太・門谷茂・桑江朝比呂 (2014) 河口域-海草場における堆積物態炭素の起源推定. 第 61 回日本生態学会大会.  
桑江朝比呂 (2013) ブルーカーボン研究の方向性と注目すべきプロセスの問題提起. 土木学会全国大会 第 68 回年次学術講演会シンポジウム研究討論会「都市沿岸海域の炭素循環：下水処理とブルーカーボン」.  
田多一史・所立樹・渡辺謙太・桑江朝比呂 (2013) 沿岸域における大気-海水間 CO<sub>2</sub> フラックスの文献調査と多変量解析. 土木学会全国大会 第 68 回年次学術講演会 VII41: 81-82.  
渡辺謙太・門谷茂・桑江朝比呂 (2013) 元素比及び安定同位体比を用いた汽水ラグーン湖における有機物の起源推定. 日本地球惑星科学連合 2013 年大会  
所立樹・桑江朝比呂 (2013) 沿岸域におけるブルーカーボンと大気中 CO<sub>2</sub> との関連性. 日本地球惑星科学連合 2013 年大会  
渡辺謙太・桑江朝比呂 (2013) 安定同位体比を用いた河口域-海草藻場における有機態炭素の動態解析. 第 60 回日本生態学会大会  
所立樹・細川真也・三好英一・桑江朝比呂 (2012) 沿岸域の測定における渦相関法と他の手法の比較. 2012 年度日本気象学会秋季大会講演要旨集 pp. 433  
Sohma, A., Y. Sekiguchi, H. Shibuki, G. Kobayashi, T. Hasumi, T. Kuwae, and M. Akai (2012) The ocean ecosystem modeling for the estimation of global warming effect. Proceedings of the East Asian Seas (EAS) congress 2012, Korea.

[その他]

ホームページ等

「ブルーカーボン:海草場は CO<sub>2</sub> を大気から吸収している」

[http://www.pari.go.jp/unit/ekanky/member/kuwae/bluecarbon\\_co2sink.html](http://www.pari.go.jp/unit/ekanky/member/kuwae/bluecarbon_co2sink.html)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

桑江 朝比呂 (KUWAE, Tomohiro)

国立研究開発法人 港湾空港技術研究所  
沿岸環境研究領域 沿岸環境研究チームリーダー

研究者番号：40359229

### (2) 研究分担者

所立樹 (TOKORO, Tatsuki)

国立研究開発法人 港湾空港技術研究所  
沿岸環境研究領域 沿岸環境研究チーム研究官

研究者番号：70543859